Chapitre 1 :
GEOTECHNIQUE ROUTIERE

I. Introduction

1. Définition :

La géotechnique routière est tout simplement l'application de la géotechnique au domaine routier.

Elle concerne :

- les travaux de terrassement (utilisation du sol comme matériaux de construction en déblai/remblai)
- les soutènements et stabilisation de talus
- les fondations des ouvrages d'art

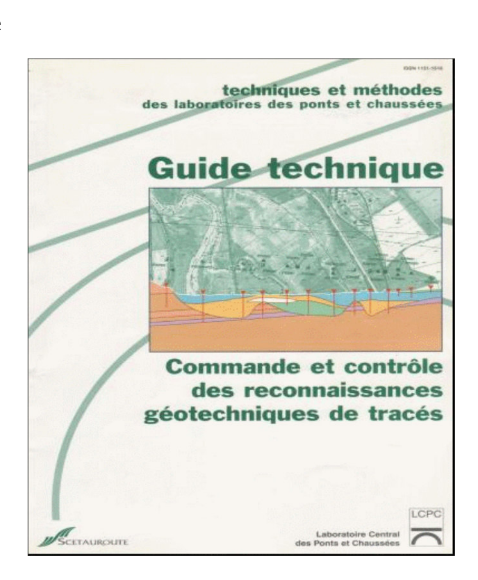
Un projet géotechnique se déroule de la façon suivante :

- Les reconnaissances géotechniques
- La reconnaissance des sols
- Les diverses études
- La fixation des conditions de mise en place des matériaux
- Le contrôle qualité et la réception de la plate-forme sur chantier

2. Méthodologie d'une étude géotechnique routière

En géotechnique routière, la méthodologie utilisée s'apparente à la démarche employée pour les routes.

Elle se décompose en 3 phases principales décrites dans le guide Technique du LCPC.



- Phase 0 : les études préliminaires :

→ Mettre en évidence les éventuels points sensibles (points durs)

- Phase 1 : les études d'avant Projet :

→ Chiffrer / Pré-dimensionner (précèdent l'enquête d'utilité publique)

- Phase 2 : les études de projet :

→ Dimensionner / Écrire les pièces du marché

Phases	Moyens
Phase 0 : études préliminaires	• lever de terrain • visites sur site • analyse de documents (cartes géologiques, sondages existants, constructions voisines,...) • photo interprétation
Phase 1 : avant-projet	• sondages destructif • sondages carottés • géophysique • pénétromètres • suivis piézométriques
Phase 2 : projet	• sondages carottés • suivis piézométriques • essais de laboratoire • mesure in-situ des caractéristiques des sols (sondages pressiométriques, pénétrométriques et scissométriques)

Tableau 1 : Moyens utilisés pour chaque phase d'étude

II. Caractérisation des sols

La connaissance du sol et de ses caractéristiques géotechniques et morphologiques, est une étape primordiale dans le choix d'une structure de chaussée. En effet, la connaissance du sol, associée à une bonne approche du trafic supporté et des matériaux de chaussée utilisés, permet d'optimiser les épaisseurs des couches de chaussées.

Pour le cas d'un projet routier, la classification des sols aura deux principaux objectifs :

- Approcher la portance du sol support afin de dimensionner les corps de chaussée. Cette classification et d'autant plus importante qu'elle conditionne le choix d'investissement et d'entretien.
- Estimer la possibilité de l'utilisation du sol en remblai ou en couche de forme.

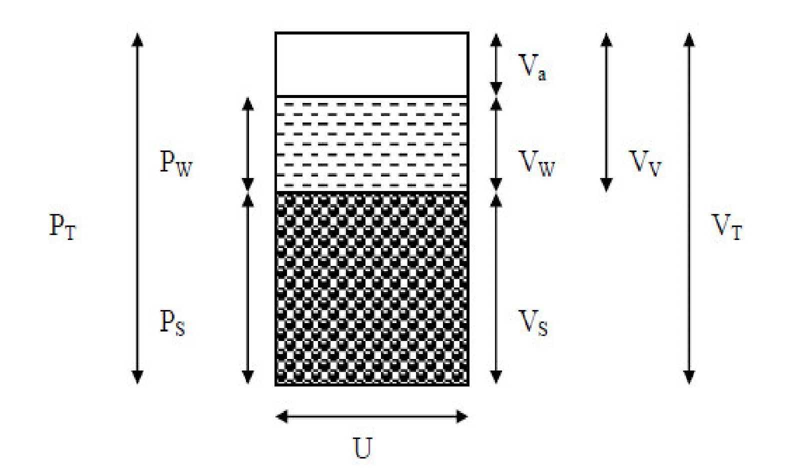
1. Constituants d'un sol

Les sols sont constitués de trois phases :

- Une phase solide (les grains)
- Une phase liquide (l'eau)
- Une phase gazeuse (l'air)

On peut, par la pensée, rassembler chaque phase en un volume partiel unique de section unité :





- P_T : poids total
- P_w : poids de l'eau
- Ps : poids des grains
- V_T : volume total
- Vs : volume des grains
- Vw : volume de l'eau
- Vv : volume du vide
- Va : volume de l'air

Figure 1 : les différentes phases d'un sol

Le squelette solide est l'élément essentiel. Il influe de façon considérable sur le comportement des sols et notamment les sols à forte proportion granulaire. La nature des grains est également à considérer.

La proportion d'eau est importante à considérer notamment dans le comportement des sols fins.

La teneur en eau est exprimée par le rapport entre le poids de l'eau est le poids des grains. Elle est noté W.

$$W\% = \frac{P_W}{P_s}.100$$

Le tableau suivant présente quelques valeurs usuelles et quelques ordres de grandeurs :

Tableau 1 : Valeurs usuelles de teneur en eau

Sols	Teneur en eau
Sable	2 à 10
Limon	10 à 30
Argile moyenne à raide	20 à 30
Argile molle	50 à 100
Vase et tourbes	80 à 300

La phase gazeuse revêt un caractère secondaire.

2. Essais permettant de déterminer les paramètres de nature des sols

Les paramètres de nature se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations qui subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les principaux paramètres retenus pour la classification concernent :

- L'analyse granulométrique

- La détermination des limites d'Atterberg, Indice de plasticité (Ip)
- La valeur au bleu de méthylène
- L'équivalent de sable
- L'indice de portance pour l'identification des sols en vue d'un dimensionnement de chaussée.

a) Analyse granulométrique par tamisage :

- **But de l'essai :**

Déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon.

Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

- **Domaine d'application :**

Cette opération permet de déterminer le pourcentage d'éléments fins (passant à 80µm) qui caractérise la sensibilité à l'eau du matériau d'une part et d'examiner, d'autre part, la forme de la courbe granulométrique : représentation graphique de la distribution des grains suivant leurs dimensions

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses des différents refus et tamisâts sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

- **Résultats et interprétations :**

Tracé de la courbe granulométrique : Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisâts cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

- En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe doit être tracée de manière continue.

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants :

- Les dimensions d et D du granulat,
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

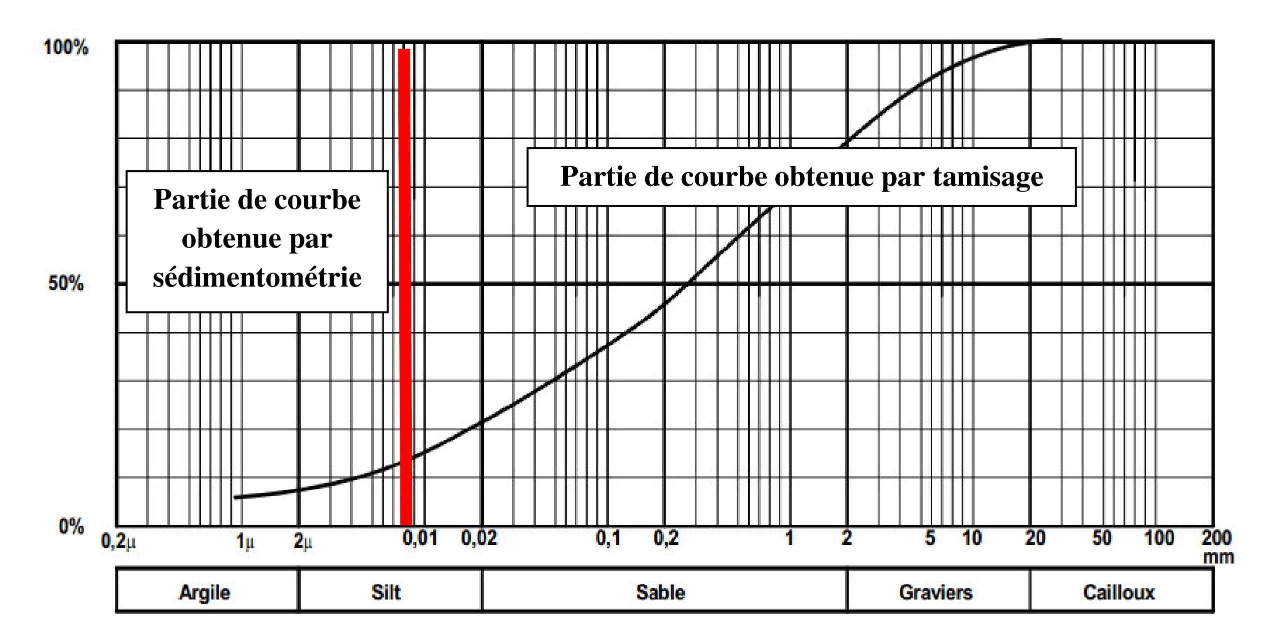


Figure 2 : Courbe granulométrique

Coefficient d'uniformité Cu.

Il est défini par : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Il sert à la description de la granulométrie. D_x est par définition le diamètre du tamis dont le tamisât cumulé est égal à x %.

C_u	**Granulométrie**
1	A une seule grosseur
1 – 2	Très uniforme
2 – 5	Uniforme
5 – 20	Peu uniforme
> 20	Très étalée

Coefficient de courbure Cc

Il est défini par : $C_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{60}.D_{10}}$

On considère que lorsque C_u est supérieur à 4 pour les graviers, et supérieur à 6 pour les sables, alors $1 < C_c < 3$ donne une granulométrie bien étalée (faible porosité).

b) Analyse granulométrique par voie humide :

- **But de l'essai :**

Tracer la courbe granulométrique des éléments fins.

- **Principe de l'essai**

La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules.

- **Résultats et interprétations :**

Le diamètre équivalent D d'une particule à une profondeur connue, après un certain intervalle de temps à partir du commencement de la sédimentation est donné par:

$$D = 0.005531\sqrt{\frac{\mu.H}{(G_s - 1).t}}$$

µ : viscosité de l'eau

H : hauteur effective en mm

Gs : gravité spécifique de la particule

t : temps écoulé en minutes.

c) Limites d'Atterberg :

- **But de l'essai :**

Caractériser l'argilosité d'un sol, et donc déterminer les teneurs en eau remarquables situées à la frontière entre ces différents états sont les « Limites d'Atterberg » :

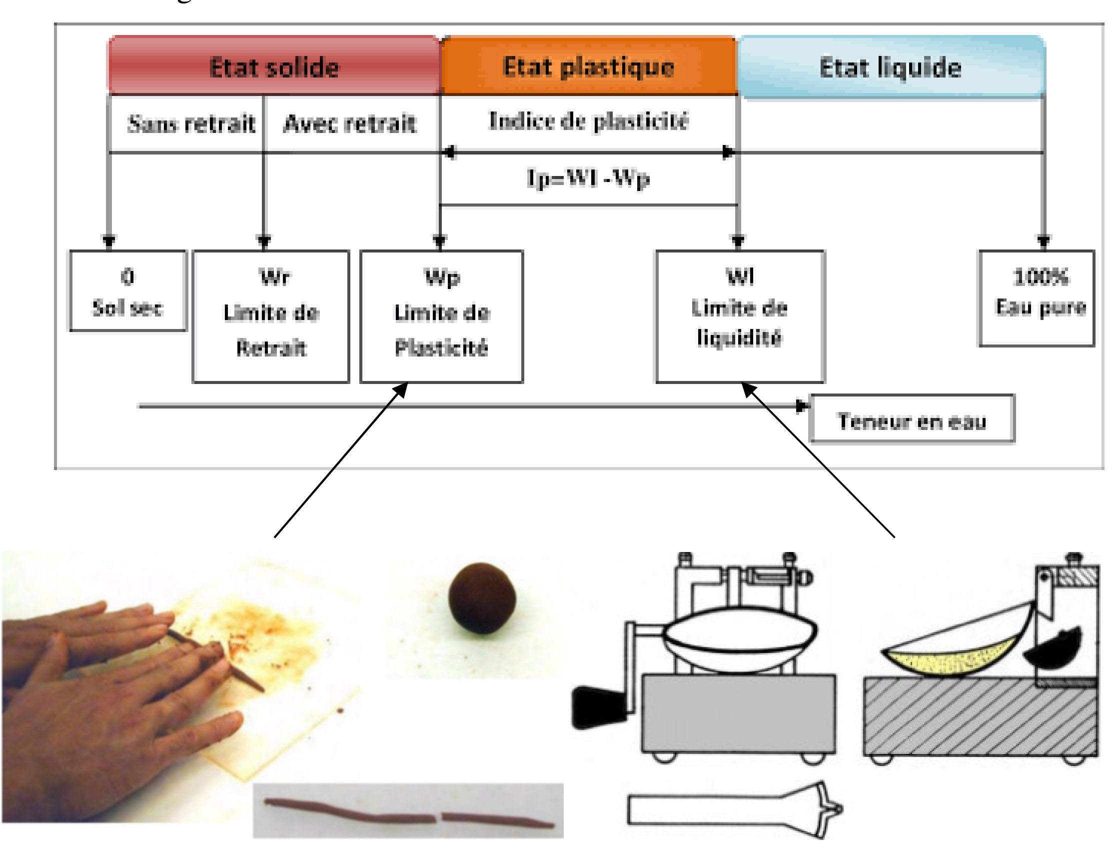


Figure 3 : États de consistance des sols

- Limite de Liquidité : WL (frontière entre état plastique et liquide)
- Limite de Plasticité : WP (frontière entre état solide et plastique)

- **Domaine d'application :**

- Cet essai s'applique généralement sur les sols comportant un pourcentage de fines (80µm) supérieur à 35%.



– La détermination de l'argilosité d'un sol par les limites d'Atterberg que par l'essai VBS (Valeur de Bleu du sol) est à privilégier dès que le sol est argileux à très argileux.

- **Principe de l'essai :**

L'essai s'effectue sur la fraction 0/400µm en deux phases :

– Détermination de la teneur en eau WL pour laquelle une rainure pratiquée dans une coupelle se ferme à 10 mm, suite à 25 chocs répétés (cette limite de liquidité correspond à une résistance à un cisaillement conventionnel)

– Détermination de la teneur en eau WP pour laquelle un rouleau de sol de diamètre 3 mm se fissure (cette limite de plasticité correspond à une résistance à la traction conventionnelle)

- **Résultats et interprétations :**

Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de consistance qui caractérise l'état hydrique d'un sol (80 à 90 % d'éléments < 400µm) :

IP = WL - WP

Ic= (WL – WN)/ IP

avec WN : teneur en eau naturelle de la fraction 0/400µm

Ic= 0 si matériau à l'état liquide

Ic= 1 si matériau à l'état solide

Tableau 2 : Classification des sols selon l'indice de plasticité IP

Indice de plasticité	Type du sol
IP < 1	Sol pulvérulents
1 ≤ IP ≤ 7	Sable argileux
7 ≤ IP ≤ 17	Argile sablonneuse
17 ≤ IP	Argile

Tableau 3 : Classification de l'argilité d'un silt (limon) selon l'indice de plasticité IP

Indice de plasticité	Degré de plasticité
0 < IP < 5	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
5 ≤ IP < 15	Moyennement plastique
15 ≤ IP < 40	Plastique
40 ≤ IP	Très plastique

Tableau 4 : Ordres de grandeur de WL et IP pour sols courants

Sol	Wl	IP
Sable	10 à 20	5 à 10
Sable limoneux	10 à 30	5 à 15



Sable argileux	15 à 40	10 à 20
Limon	50 à 80	15 à 25
Argile limoneuse	60 à 100	20 à 30
Argile plastique	80 à 150	> 30
Argile très plastique	> 150	> 50

Tableau 5 : État de consistance du sol en fonction de Ic

Indice de consistance	Consistance du sol
Ic ≤ 0	Liquide
0 < Ic < 15	Plastique
Ic = 1	Solide plastique
Ic > 1	Solide ou semi-solide

Tableau 6 : État de consistance du sol en fonction de IL

Indice de liquidité	Consistance du sol
IL < 0	Très dure
0 < IL < 1	Dure à très plastique
IL > 1	Fluide

d) Valeur de Bleu du Sol (VBS) :

- **But de l'essai :**

Déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient.

- **Domaine d'application :**

Cet essai concerne les sols et certains matériaux rocheux. Toutefois, pour les matériaux les plus argileux, on privilégiera la réalisation des limites d'Atterberg.

- **Principe de l'essai :**

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2mm des sables courants ou sur les fillers (0 / 0,125 mm) contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou un tout venant. II a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.



On appelle valeur de bleu VB d'un sable (MB dans la norme européenne), la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2mm du sable.

On appelle valeur de bleu des fillers VBF la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0 / 0,125 mm d'un granulat (fillers, sable fillerisé, tout venant gravillon).

On appelle valeur de bleu sols VBS la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50mm d'un sol. Pour cet essai on travaille sur la fraction 0/5 du matériau.

Une solution de bleu de méthylène est ajoutée progressivement par doses successives à une suspension de l'échantillon de granulats dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par l'échantillon est vérifiée après chaque ajout de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée.

- **Résultats et interprétations :**

La VBS nous est donnée par formule : VBS = B .C . 100 / Ms (en grammes de bleu pour 100g de matériau sec)

B : masse de bleu introduite (solution à 10g/l).

C : proportion du 0/5 mm (soumis à l'essai) dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

Ms : masse sèche de la prise d'essai.



Figure 4 : Type de sol en fonction de la valeur « VBS »

e) Équivalent de Sable (ES) :

- **But de l'essai :**



L'essai équivalent de sable permet de mettre en victoire la proportion de poussière fine nuisible dans un matériau. Et surtout utilisé par les matériaux routiers et les sables à béton. Car il permet de séparer les sables et graviers des particules fines comme les limons et argiles.

- **Domaine d'application :**

Cette détermination trouve son application dans de nombreux domaines notamment les domaines suivants :

- Classification des sols.
- Étude des sables et sols fins peu plastique.
- Choix et contrôle des sols utilisable en stabilisation mécanique.
- Choix et contrôle des sables à béton.
- Contrôles des sables utilisés en stabilisation chimique.
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobes hydrocarbonés.

- **Principe de l'essai :**

L'essai équivalent de sable s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5mm ; il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (argileux par exemple).

- **Résultats et interprétations :**

- C'est un essai empirique, rapide et simple.
- Il s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5mm (module AFNOR 38)
- L'essai prolonge l'essai de plasticité quand $Ip < 5$.
- Il sert à éliminer les sols gélifs, à choisir des sols à stabiliser.
- La masse de matériaux nécessaire à l'essai est inférieur au kilogramme.
- L'essai se fait sur deux échantillons et l'équivalent de sable est la moyenne des deux résultats.
- La valeur de l'équivalent de sable chute très rapidement dès qu'il y a un faible pourcentage de limon ou d'argile dans le sol pulvérulent.

ES = (H2 / H1) . 100

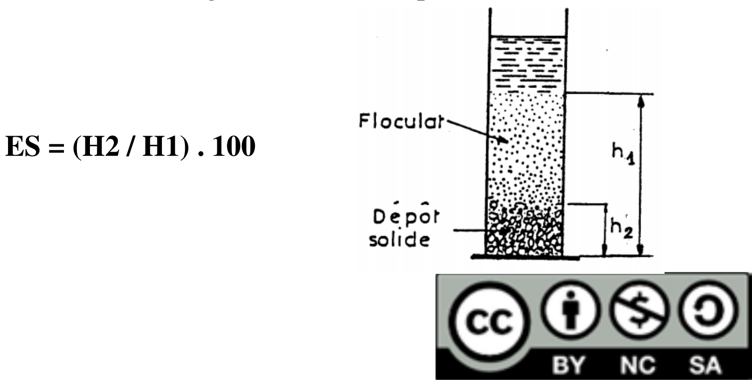


Tableau 7 : Caractérisation des sols à partir de la valeur de ES

Nature	ES
Sable pur et propre	100
Sol non plastique	40
Sol plastique	20
Argile pur	0

3. Les essais de détermination des paramètres de compactage

a) Essai Proctor

- **But de l'essai :**

Détermination des références de compactage d'un matériau : masse volumique et teneur en eau.

- **Principe de l'essai :**

L'essai Proctor, complètement normalisé, consiste à placer dans un moule de dimensions déterminées, un échantillon humidifié de manière homogène à une teneur en eau donnée, peu élevée au début, et à compacter cet échantillon par couches au moyen d'une dame de poids standardisé tombant d'une hauteur standardisée.

Pour chacune des teneurs en eau considérée, on détermine le poids volumique sec du sol et on établit la courbe des variations de ce poids volumique en fonction de la teneur en eau.

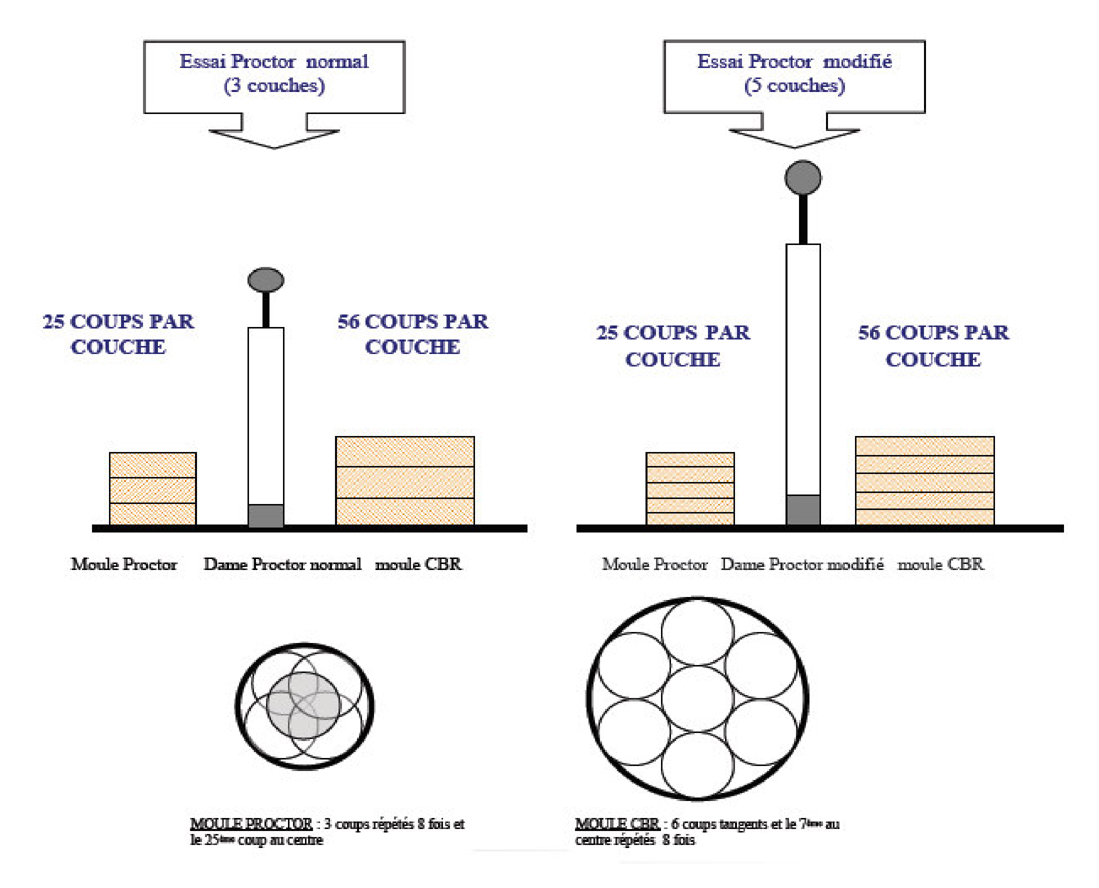


Figure 5 : Principe de l'essai Proctor normal et modifié

- **Résultats et interprétations :**

Énergie spécifique de compactage est égale à :

$$Energie\ spécifique = \frac{M\ de\ la\ dame\ .Nbre\ de\ coups\ par\ couche\ .Nbre\ de\ couches\ .pesenteur}{Volume\ du\ moule}$$

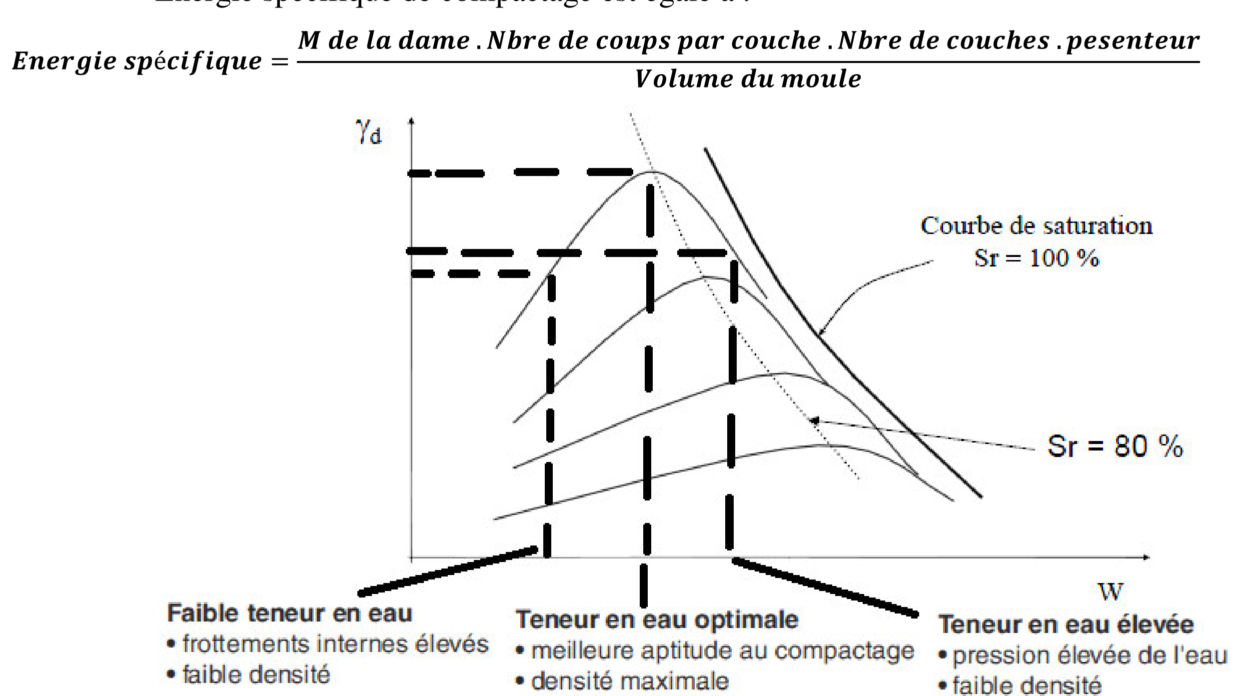


Figure 6 : Courbe d'essai Proctor

Ces courbes sont utiles Sr = 100 % et 80 % :

- La courbe γd = f (w%) pour Sr = 100% constitue la courbe enveloppe des courbes Proctor des différents sols. La branche droite de ces courbes vienne s'y raccorder tangentiellement.
- La courbe γd = f (w%) pour Sr = 80% situe approximativement, pour les sols comportant une fraction argileuse, le lieu des optimums.

b) L'indice de portance (CBR)

Les initiales CBR sont l'abréviation de California Bearing Ratio.

- **But de l'essai :**

Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport à un sol type, constitué par des pierrailles concassées et compactées, extraites d'une carrière de Californie.

Cet essai permet de :

- Établir une classification des sols (GTR)
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement
- Déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente → épaisseur diminue)

- **Principe de l'essai :**

L'indice portant californien CBR est le rapport, exprimé en % de la pression produisant un enfoncement donné au moyen d'un poinçon cylindrique normalisé (de section 19.32 cm²) se déplaçant à une vitesse déterminée (1.27 mm/min) et de la pression nécessaire pour enfoncer le même poinçon dans les mêmes conditions, dans un matériau type.

Cet indice peut être pris à différent état hydrique (soit à différent niveau de compactage) :

- A l'optimum : indice portant à la teneur en eau optimale Wopm
- A la teneur en eau naturelle (Indice Portant immédiat) à Wnat
- Après saturation : on immerge le moule pendant quatre jours dans l'eau et on enfonce le poinçon à vitesse constante.

L'enfoncement est mesuré en fonction de la charge. Par définition, on note deux CBR :

$$\mathrm{CBR_1} = \frac{\text{Effort de pénetration à 2.5 mm d'enfoncement(en KN)}}{13.35} . 100$$

$$CBR_2 = \frac{\text{Effort de pénetration à 5 mm d'enfoncement(en KN)}}{20} . 100$$

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur exprimée en %.

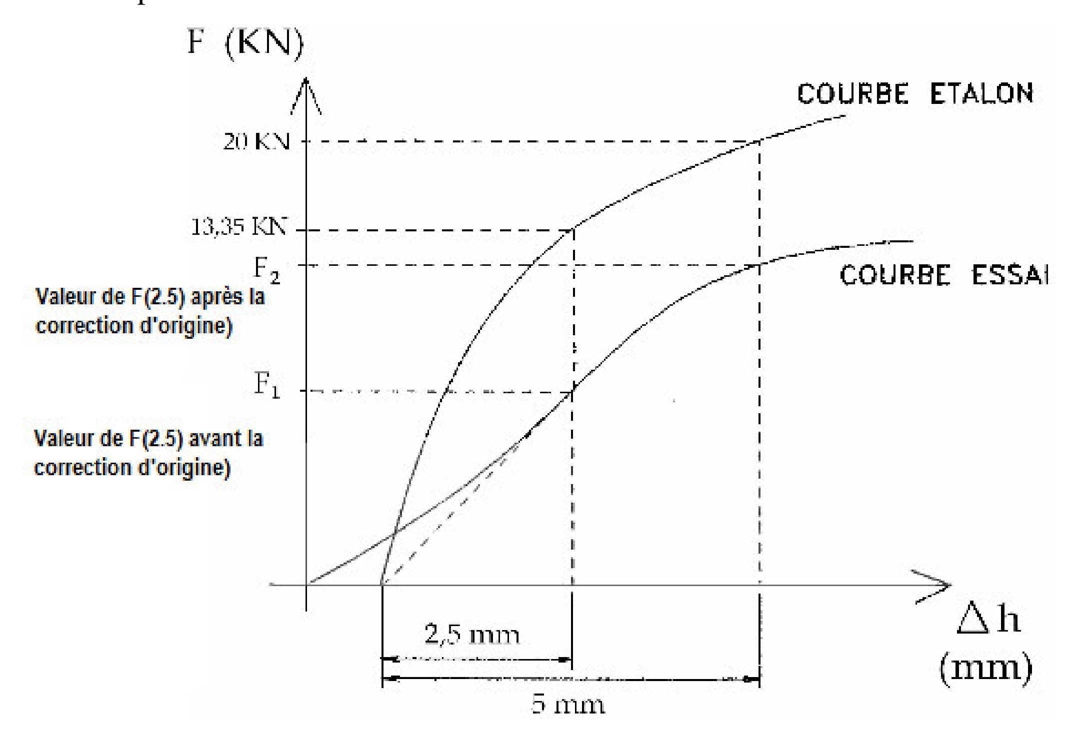


Figure 7 : Courbe d'essai CBR

Tableau 8 : Définitions pour l'essai CBR

Définition		
Enfoncement	**Contraintes correspondantes**	
	Dans le sol testé	**Dans le matériau type**
2.54 mm	P1	P1' = 6.3 MPa
5.08 mm	P2	P2' = 10.3 MPa

Tableau 9 : Valeurs usuelles de l'indice CBR

	CBR
Sol mous à très mous	<2
Argiles	2 – 10
Limons et argiles raides	8 – 40
Sables	8 – 30
Graves	15 – 80
Concassée	80 - 100

4. Les essais de détermination des paramètres de comportement mécanique

a) Essai Los Angeles



L'objet de cet essai est de déterminer la résistance aux chocs.

Il consiste à mesurer la quantité des éléments fins produits en soumettant le granulat aux chocs de boules normalisés dans une machine dite « Los Angeles » qui est un broyeur de laboratoire.

Tamisée sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, lavée, séchée et pesée (à 1 g près), la prise d'essai (5000 +/- 5 g) est placée dans un tambour avec une charge de boulets appropriée. Entraînés durant 500 tours par tablette en acier, ces boulet retombent avec le matériaux qu'il fragmentent. Ce dernier est ensuite lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et le passant est pesé (masse m).

$$\frac{LA}{100} = \frac{m}{500}$$

Les seuils retenus diffèrent selon les utilisations des sols. Au-delà de 45, le sol ne peut pas être utilisé en couche de forme.

b) Essai Micro-Deval

L'objectif de cet essai et d'apprécier la résistance à l'usure des granulats ; l'essai est réalisé en présence d'eau pour se rapprocher des conditions réelles de séjour des granulats dans les chaussées.

Il consiste à mesurer dans des conditions bien définies l'usure des granulats par frottements réciproques dans un cylindre en rotation. L'usure est mesurée par la quantité de fines produites.

Cas d'un gravillon compris entre 4 et 14 mm :

Lavée, séchée et pesée (à 1 g près), la prise d'essai (500 +/- 2 g) est introduite dans un cylindre normalisé avec une charge de billes d'acier (2000, 4000 ou 5000 g selon la granularité), et 2.5 litres d'eau. Après 12000 rotations (2 heures), le matériau est lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et le refus est pesé (masse m').

$$\frac{MDE}{100} = \frac{500 - m'}{500}$$

Le seuil est également différent selon l'utilisation voulue du matériau.

III. Classification géotechnique des sols

Plusieurs classifications dans différent pays :

- Classification LCPC (laboratoire central des ponts et chaussées)
- Classification USCS (Unified soil classification system) établie par Casagrande : identique à la classification LCPC
- Classification GTR (Guide des terrassements routiers)



- Classification AASHO (American Association State Highways Officials)

1. La classification LCPC

Cette classification utilise les résultats fournis par la granulométrie et les limites d'ATTERBERG, ainsi quelques essais complémentaires.

CALSSIFICATION DES SOLS GRENUS					
définitions			sym	conditions	Appellations
graves	+ 50 % : D >2mm	-5 % <0.08 mm	Gb GW	Cu = D60 / D10 > 4 Et Cc = (D30)² / (D10 x D60) compris entre 1 et 3	Grave propre Bien graduée
			Gm Gp	Une des conditions de Gb Non satisfaite	Grave propre Mal graduée
		+ 12 % : <0.08 mm	GL GM	Limite d'ATTERBERG au-dessous de A	Grave limoneuse
			GA GC	Limite d'ATTERBERG au-dessus de A	Grave argileuse

CALSSIFICATION DES SOLS GRENUS					
définitions			sym	conditions	Appellations
sables	+ 50 % : D < 2mm	-5 % <0.08 mm	Sb SW	Cu = D60 / D10 > 6 Et Cc = (D30)² / (D10 x D60) compris entre 1 et 3	Sable propre Bien gradué
			Sm Sp	Une des conditions de Sb Non satisfaite	sable propre Mal gradué
		+ 12 % : <0.08 mm	SL SM	Limite d'ATTERBERG au-dessous de A	Sable limoneux
			SA SC	Limite d'ATTERBERG au-dessus de A	Sable argileux
Lorsque 5 % < % inférieur à 0.08 mm <12 on utilise un double symbole					

CALSSIFICATION DES SOLS FINS						
définitions		sym	Détermination de la plasticité sur chantier			Appellations
			Agitation	Consistance	Résistance à sec	
Sols fins – Argile et Limon	Limite de Liquidité < 50 %	Lp ML	Rapide à lente	Nulle	Nulle	Limon peu plastique
		Ap CL	Nulle à lente	Moyenne	Moyenne à grande	Argile peu plastique
		Op OL	Lente	Faible	Faible à moyenne	Limon et Argile organique peu plastique
	Limite de Liquidité > 50 %	Lt MH	Lente à nulle	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Limon très plastique
		At CH	Nulle	Grande	Grande à très grande	Argile très platique
		Ot OH	Nulle à très lente	Faible à moyenne	Moyenne à grande	Limon et Argile organique très plastique
Matière organique dominante		T Pt	Reconnaissable à l'odeur, couleur sombre, texture fibreuse, faible densité humide			Tourbe et autre sol très organque



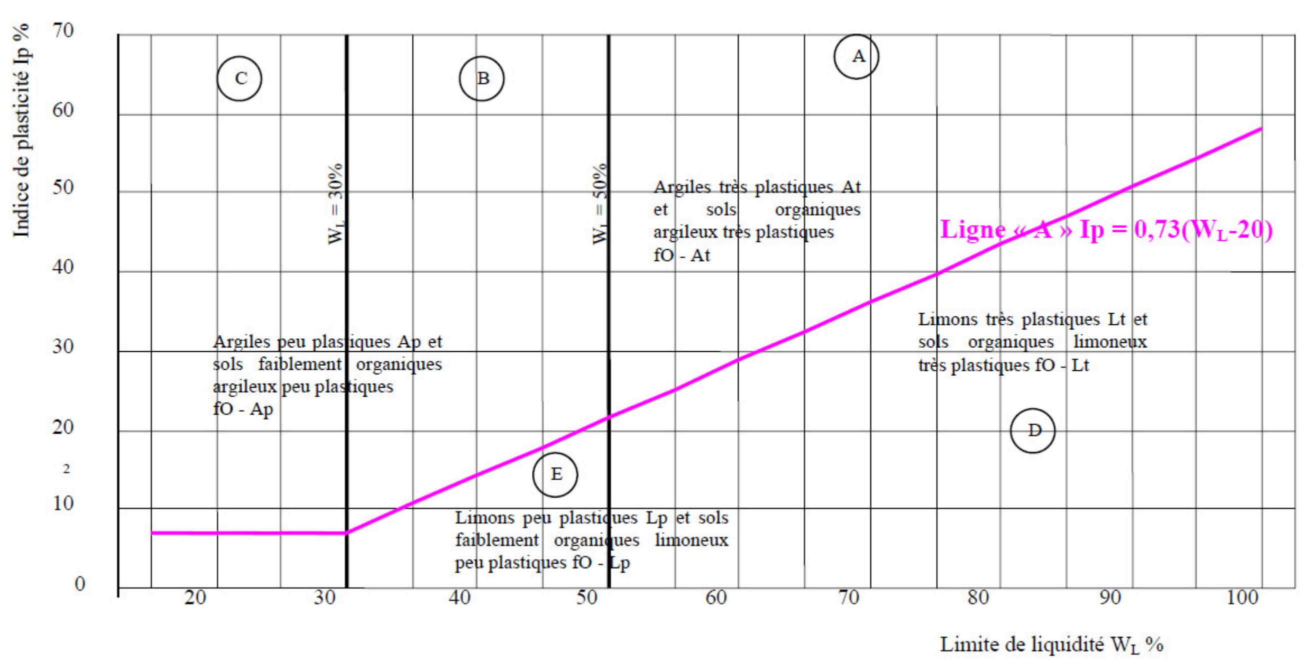
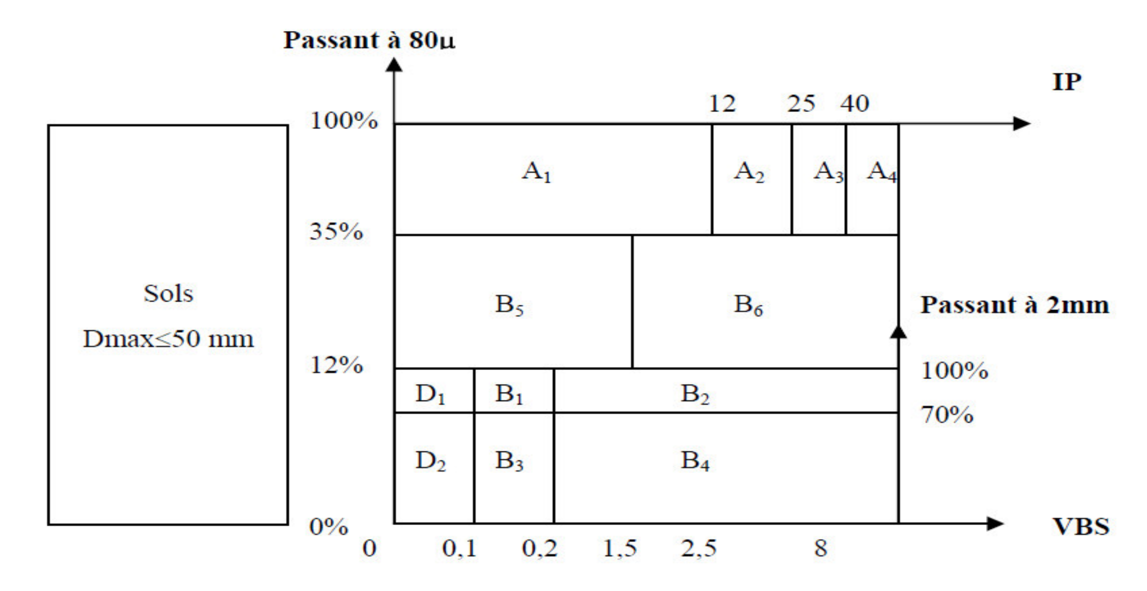


Figure 8 : Abaque de plasticité de Casagrande

2. La classification GTR (AFNOR – SERTA)

C'est la seule classification présentant un réel intérêt pratique et utilisé dans les travaux de terrassement.





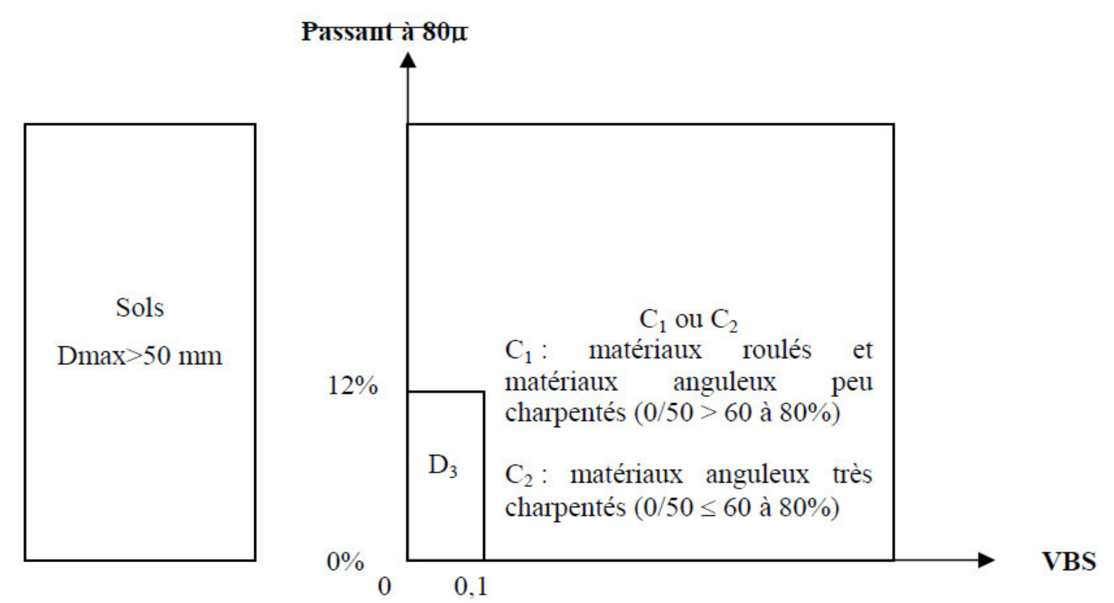


Figure 9 : Classification française des sols de Dmax > 50 mm

Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R_1
			Calcaires	R_2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R_3
		Roches siliceuses	Grès, Poudingues, brèches...	R_4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R_5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R_6

Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels	F

Figure 10 : Classification française des sols rocheux et organiques

